

Impacto da rota de incorporação de ar nas propriedades de materiais formulados com cimento Portland

Impact of the air entrainment path on the properties of materials formulated with Portland cement

Danilo dos Reis Torres
Alessandra Lie Fujii
Roberto Cesar de Oliveira Romano
Rafael Giuliano Pileggi

Resumo

Este trabalho avalia o impacto da rota de incorporação de ar nas propriedades de materiais cimentícios. Para tanto, a distribuição granulométrica de um microconcreto foi mantida constante e o ar foi incorporado por meio de duas rotas de processamento: injeção de espuma aquosa e adição de incorporador de ar na formulação. Os ensaios no estado endurecido foram realizados 28 dias após as moldagens dos corpos de prova. Os resultados mostraram que a injeção de espuma aquosa pode gerar maior quantidade de ar incorporado no estado fresco com menor quantidade de aditivo. No estado endurecido não foram observadas significativas variações na porosidade total e na resistência mecânica dos microconcretos. Entretanto, a permeabilidade ao ar, propriedade intimamente ligada à durabilidade, foi maior nos microconcretos obtidos a partir da injeção de espuma aquosa devido às alterações microestruturais.

Palavras-chave: Microconcreto poroso. Incorporação de ar. Propriedades mecânicas. Permeabilidade ao ar.

Abstract

This paper evaluates the impact of the air-entrainment path on the properties of cementitious material. In order to do this, the granulometric distribution of a micro-concrete was maintained constant and the air was incorporated via two processing paths: injection of aqueous foam or addition of air-entraining agent in the formulation. The hardened properties were evaluated after 28 days and the results show that the injection of aqueous foam can provide a higher level of air-entrainment in the fresh state using lower admixture content. In the hardened state no significant variations in the total porosity or in the mechanical strength of the micro-concretes were observed. However, air permeability, which is closely linked to durability, was higher in the micro-concrete obtained through the injection of aqueous foam due to microstructural alterations.

Keywords: Air-incorporation-air-entrainment. Mechanical properties. Air-permeability.

Danilo dos Reis Torres
Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

Alessandra Lie Fujii
Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

Roberto Cesar de Oliveira Romano
Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

Rafael Giuliano Pileggi
Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

Recebido em 12/12/12
Aceito em 12/04/14

Introdução

A busca por materiais cimentícios leves, sendo o concreto aerado o exemplo mais relevante, é uma alternativa para a redução do impacto ambiental gerado pela produção de cimento, já que a presença de vazios na estrutura é responsável pelo aumento do volume e, consequentemente, pela redução do consumo dos insumos utilizados nas formulações (ROMANO *et al.*, 2009). Desse modo, a utilização de incorporadores de ar nas formulações de materiais cimentícios pode propiciar ganhos econômicos, ambientais e sociais.

Normalmente, concretos convencionais apresentam densidades entre 2.200 e 2.600 kg/m³, o que representa uma carga muito grande atuante sobre a estrutura. Por outro lado, os concretos aerados podem ser obtidos com densidades entre 300 e 1.850 kg/m³ (NEVILLE, 1982), sendo tal redução de grande interesse prático, pois possibilita reduzir a dimensão das fundações, facilita o manuseio, aumenta a produtividade e pode tornar o concreto mais ecoeficiente, devido à redução da massa de insumos para o preenchimento de um mesmo volume (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).

Mesmo sendo importante em diversos fins, a presença dos vazios na estrutura dos concretos pode gerar vários problemas, como dificuldade de controle do volume, da homogeneidade e da estabilidade das bolhas no estado fresco (POWERS, 1954), separação de fases (finos/agregados), fissuração, redução da resistência mecânica e do módulo de elasticidade, e aumento da permeabilidade no estado endurecido, tornando o concreto menos resistente e durável (DU; FOLLIARD, 2005). Salienta-se que

os concretos avaliados neste trabalho não apresentam finalidade estrutural.

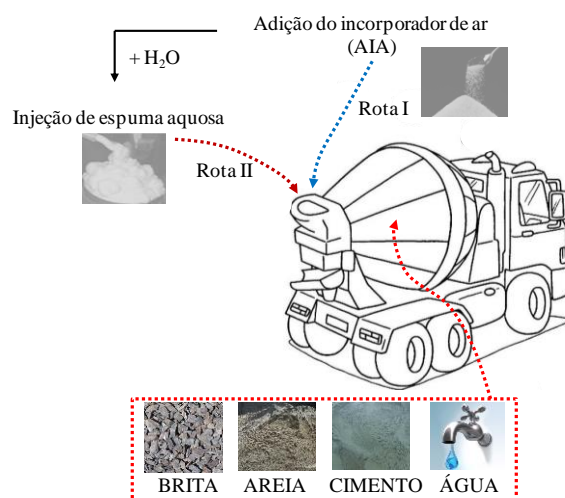
Entre as diversas formas reportadas na literatura para a obtenção do material cimentício leve, a mais comum é a utilização de aditivos incorporadores de ar, mas outras rotas podem também ser utilizadas, como é o caso da injeção de espuma aquosa nas formulações (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).

Enquanto na primeira, mais simples e prática, os poros são gerados pelo cisalhamento imposto durante a mistura do concreto com o aditivo colocado inicialmente na formulação do material seco, a segunda rota consiste no processamento separado de um concreto convencional e uma espuma aquosa, gerada em equipamentos apropriados, a partir da mistura de incorporador de ar e água, conforme apresentado na Figura 1 (adaptado de Romano, Cardoso e Pileggi, 2011).

Quando o ar é incorporado intencionalmente nessas composições, as bolhas são geradas na fase contínua (pasta), e seu volume e estabilidade dependem de diversos fatores, como teor de água, tipo e característica do ligante, temperatura, tipo e teor do aditivo, etc. (RAMACHANDRAN, 1984; SALAGER, 2002; ROMANO *et al.*, 2009; ROMANO; PILEGGI, 2012).

Neste trabalho, a composição granulométrica, as propriedades físico-químicas das matérias-primas, o teor de água (8% em massa), a condição climática (25 °C) e o tipo de aditivo (lauril sulfato de sódio) foram mantidos constantes, variando-se somente a rota de incorporação de ar e o teor do aditivo.

Figura 1 - Ilustração de duas rotas de processamento de concretos porosos



Nota: Rota I: utilização de incorporador de ar na formulação. Rota II: adição de espuma aquosa gerada separadamente do concreto convencional.

Incorporação de ar em materiais cimentícios

Os aditivos incorporadores de ar são agentes químicos de superfície, tensoativos, que apresentam na mesma molécula uma porção hidrofílica (polar) e outra hidrofóbica (apolar), como ilustrado na Figura 2.

A cadeia apolar é, geralmente, constituída por hidrocarbonetos; em contrapartida, os ramos polares são formados por grupamentos iônicos, não iônicos ou anfóteros, e a presença do grupamento polar ou o comprimento/ramificação da cadeia apolar determinam as propriedades dos aditivos incorporadores de ar.

Quando tais aditivos são utilizados, há tendência natural de adsorção nas interfaces, reduzindo a tensão superficial e facilitando a geração e estabilização das bolhas de ar.

De acordo com a literatura, tais bolhas (geradas em função da ação do incorporador de ar) são ancoradas na superfície do cimento e criam pontes entre as partículas (RAMACHANDRAN, 1984; ANTUNES, 2006). No entanto, apesar de tal afirmação ser muito utilizada para descrever as interações entre as partículas sólidas e as bolhas,

trata-se de uma descrição muito simplista do que ocorre nas pastas cimentícias.

Na realidade, os aditivos em suspensão podem (ROMANO, 2013):

- (a) formar bolhas que são ancoradas na superfície do cimento;
- (b) formar bolhas livres na pasta (sem ancoramento), as quais coalescem e colapsam facilmente;
- (c) estar livres sem a formação das bolhas;
- (d) estar ancorados na interface cimento-ar;
- (e) formar aglomerados de bolhas sem ancoramento no cimento; e
- (f) formar aglomerados de bolhas ancorados nas partículas.

Na Figura 3 é apresentada uma ilustração mais completa dos fenômenos de interface cimento-ar-água.

A maior parte dos aditivos permanece ancorada na superfície do cimento na forma de bolhas, mas, mesmo em pequenas quantidades livres na solução, é suficiente para alterar a tensão superficial da água de amassamento. As bolhas não ancoradas apresentam maior mobilidade entre as partículas e, por isso, colapsam mais rapidamente.

Figura 2 - Ilustração de uma molécula de incorporador de ar, em que a cauda apolar é hidrofóbica e a cabeça polar é hidrofílica

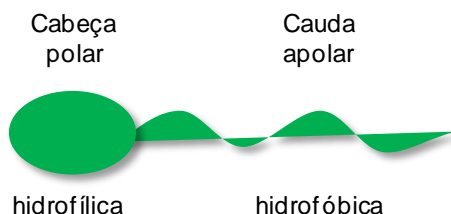
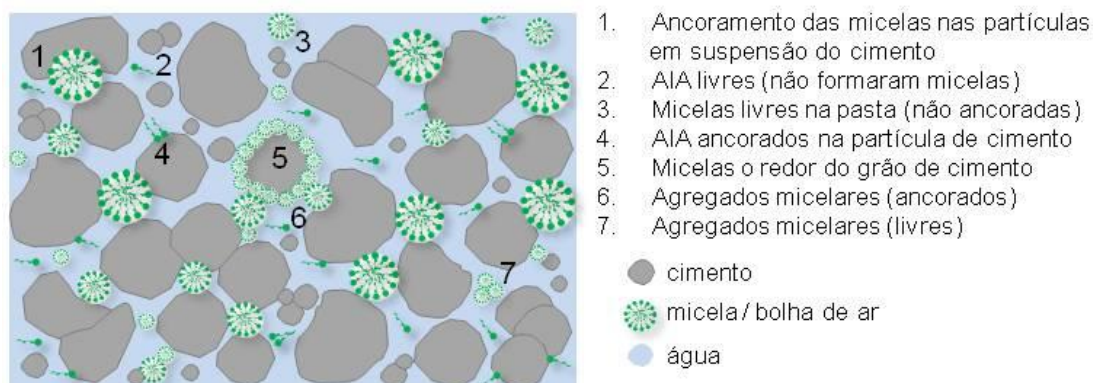


Figura 3 - Ilustração das possíveis formas de ancoragem das bolhas nas pastas cimentícias



No caso de a incorporação de ar ocorrer a partir da introdução do aditivo juntamente ao pó seco, após a adição da água pode haver competição entre a adsorção à superfície da partícula e a formação das bolhas de ar (ROMANO, 2013). Por outro lado, quando as bolhas de ar são introduzidas intencionalmente a partir da adição da espuma aquosa, não existe tal competição e a quantidade de ar pode ser maior com menor quantidade de aditivo. No entanto, as bolhas geradas nesta segunda rota de processamento são menos estáveis e colapsam mais rapidamente.

De acordo com Ramachandran (1984), se a molécula do incorporador de ar apresentar caráter iônico, as bolhas irão adquirir carga na superfície, fazendo com que duas bolhas se mantenham afastadas (eletrostaticamente) durante a mistura, evitando a coalescência e aumentando a estabilidade.

O cimento Portland apresenta diferentes cargas superficiais, pois é composto de diversas fases mineralógicas, e um aditivo iônico pode ser adsorvido na superfície do sólido (seja na forma de bolha ou natural) ou permanecer isolado em suspensão, na forma de bolha ou dissociado.

Neste segundo caso, as bolhas podem se comportar como agregados compressíveis e perturbar o fluxo das partículas, e os íons dissociados do aditivo podem afetar as propriedades superficiais do meio líquido.

Independentemente disso, a camada de água ao redor da bolha pode estar cheia de produtos de hidratação do cimento, servindo para separá-las e deflocular o sistema (RAMACHANDRAN, 1984; RIXON; MAILVAGANAN, 1999; WHITING; NAGI, 1998).

Como a estrutura gerada pela incorporação de ar é um somatório dos micro e macroporos incorporados na pasta que separa os agregados, e a presença dos vazios pode alterar a orientação dos produtos da hidratação do cimento (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000), a forma de obtenção de tais vazios pode influenciar as propriedades do material em uso.

Sendo assim, este trabalho foi realizado com o objetivo de comparar os efeitos da rota de processamento nas propriedades dos microconcretos no estado fresco e após o endurecimento.

Métodos de ensaio

Os métodos de ensaio aplicados no trabalho foram os seguintes.

Peneiramento

A determinação da distribuição granulométrica dos agregados foi realizada usando a série completa de peneiras (razão = $2^{1/4}$).

Distribuição granulométrica a laser

As distribuições granulométricas do *filer* calcário e do cimento foram medidas em um equipamento Malvern, modelo Mastersizer S long bed, com faixa de detecção de 0,05 µm a 555 µm.

Área superficial específica (ASE)

A medida, baseada na adsorção física e dessorção de gás na superfície da amostra sólida, foi realizada a partir do método de BET (Brunauer, Emmett e Teller), em um equipamento Gemini 2375 – Micromeritics com pré-tratamento das amostras em temperatura de 100 °C e pressão de 100 mmHg por 24 h.

Picnometria de gás He

A densidade real dos pós foi determinada por picnometria de adsorção de gás hélio, em equipamento Multipicnometer, da marca Quantachrome MVP 5DC.

Ar incorporado

A avaliação da densidade e do ar incorporado na pasta e na argamassa foi realizada a partir do método gravimétrico, seguindo a norma técnica NBR 13278, com base no teor de água utilizado na mistura e na densidade real dos pós, obtidas por picnometria de gás He.

Porosidade (ensaio de imersão - Arquimedes)

Após a cura por 28 dias em ambiente saturado de umidade em temperatura de 25 °C, a porosidade foi medida por ensaio de imersão de Arquimedes a partir das massas seca, úmida e imersa dos corpos de prova. As amostras utilizadas apresentavam diâmetro de 50 mm e altura de 60 mm.

Resistência mecânica

A resistência à compressão uniaxial foi medida com uma máquina de ensaio universal, Instron, modelo 5569, com controle de carregamento de 12.000 N/s. Os corpos de prova apresentavam diâmetro de 50 mm e espessura de 60 mm, e foram curados por 28 dias em ambiente saturado de umidade em temperatura de 25 °C.

Permeabilidade ao ar

Foi estimada a partir da técnica de *vacuum-decay* (TORRENT, 1992; TORRENT; FRENZER, 1995; ROMANO, 2013), utilizando-se as amostras secas em estufa à 60 °C por 24 h, em sílica gel. O aparelho consiste basicamente em uma bomba de vácuo ligada a uma câmara de sucção, que fica em contato com a superfície da argamassa, onde é formada, inicialmente, uma região de pressão negativa. Quando a bomba de vácuo é ligada, um transdutor registra as variações de pressão ao longo do tempo e o início do ensaio ocorre com o desligamento da bomba, quantificando-se o tempo de decaimento da pressão. A estimativa da permeabilidade do material (expressa em valores de k_1 (m²)) é obtida a partir da equação de *Forchheimer* (eq. 1), considerando, para efeito de simplificação, duas hipóteses: compressibilidade do gás desprezível; e utilização apenas do termo linear (INNOCENTINI *et al.*, 2009).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2, \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

L é a espessura da amostra;

μ é a viscosidade do fluido;

v_s é a velocidade de percolação do ar;

ρ é a densidade do fluido; e

ΔP é a variação de pressão.

O termo $\mu v_s/k_1$ ilustra os efeitos viscosos da interação fluido-sólido, enquanto o termo $\rho v_s^2/k_2$ representa os efeitos inerciais.

Microscopia óptica

As imagens da microestrutura dos microconcretos foram obtidas através do microscópio óptico

Hirox, modelo digital KH-7700, com aumentos de 50x e 200x.

Materiais utilizados

A composição utilizada para comparação entre as rotas de processamento foi formulada com cimento (CPIIF-32, Cimpor), *filer* calcário, areias calcárias britadas com várias composições granulométricas, aditivo superplastificante à base de policarboxilato de sódio (Melflux 2651, Basf) e aditivo incorporador de ar à base de lauril sulfato de sódio (Texapon). Este último foi tanto utilizado para a geração da espuma aquosa quanto adicionado diretamente à formulação. No microconcreto utilizado como referência, o incorporador de ar foi substituído pelo agente antiespumante (Defoam 50PE, Peramin).

Na Figura 4 são apresentadas as distribuições granulométricas das matérias-primas empregadas na formulação dos microconcretos, e na Tabela 1 são apresentadas a densidade real, a área específica e d_{10} , d_{50} e d_{90} , que representam o diâmetro-limite para quais 10%, 50% e 90% das partículas são menores. Todas as caracterizações foram feitas conforme descrito em Métodos.

Os microconcretos foram formulados com 12% de cimento, 20% de *filer* calcário e 68% de um *mix* das areias, resultando na distribuição granulométrica apresentada na Figura 5, juntamente com algumas características físicas da composição dos pós. Todas as porcentagens anteriormente citadas foram calculadas em relação à massa total presente na formulação utilizada como referência.

Figura 4 - Distribuições granulométricas das matérias-primas empregadas nas formulações dos microconcretos

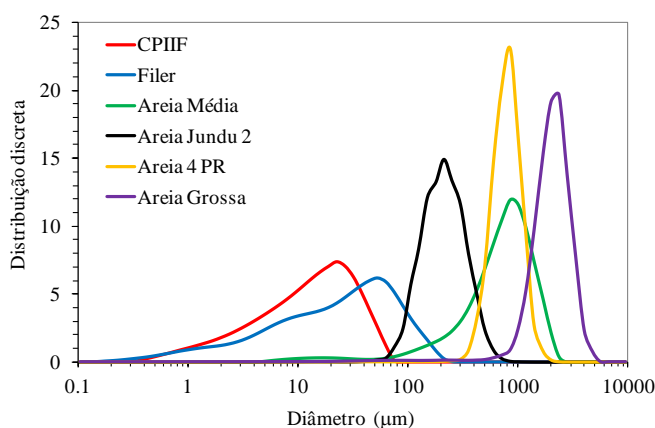
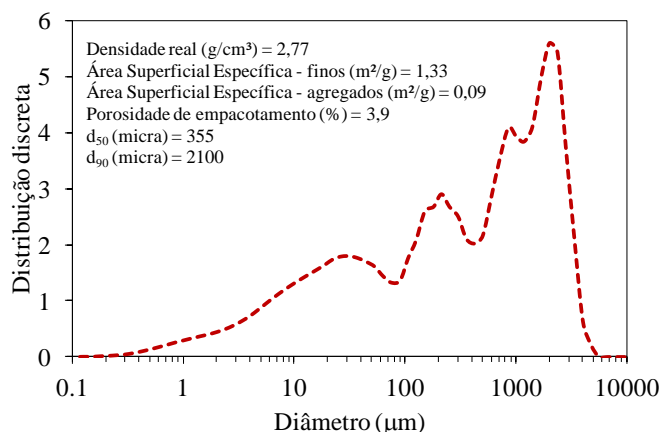


Tabela 1 - Propriedades físicas das matérias-primas

Propriedade	Cimento	Filer	Areia média	Areia jundu	Areia 4	Areia grossa
Densidade real (g/cm ³)	2,98	2,76	2,78	2,63	2,81	2,74
Área específica (m ² /g)	1,75	1,23	0,19	0,29	0,10	0,04
D ₁₀ (μm)	2,7	2,4	180	106	450	1100
D ₅₀ (μm)	16,6	25	710	190	750	1900
D ₉₀ (μm)	48,2	90	1200	355	1000	2800

Figura 5 - Distribuição granulométrica dos microconcretos



Em todos os casos, a quantidade de água foi mantida constante (8% em massa). Por isso, no caso da injeção de espuma aquosa, o microconcreto foi pré-misturado, descontando-se a quantidade de água presente na espuma, a qual foi preparada conforme ilustrado na Figura 6.

Uma solução de água deionizada e incorporador de ar, com concentração de 10 g/L, foi colocada em um copo de Becker (a) e agitada por 3 min com o auxílio de uma hélice do tipo espiral, em 1.500 rpm (b). Após esse tempo, a espuma gerada foi coletada e adicionada ao microconcreto nos teores adotados (c). Deve ser salientado que nenhum tipo de estabilizante de bolhas de ar foi adicionado à espuma.

Mistura dos microconcretos

Na Figura 7 é apresentada a programação elaborada para a mistura dos microconcretos e o reômetro utilizado. A ideia foi adicionar o incorporador de ar em pó ou a espuma aquosa após prévia mistura e desaglomeração da suspensão. Por isso, o processamento consistiu em quatro etapas:

(a) adição da água (vazão de 45 g/L) com 30 s de cisalhamento do pó seco e homogeneização do microconcreto em 500 rpm até 210 s;

(b) desaglomeração das partículas por 1 min com intenso cisalhamento em 1.000 rpm de velocidade;

(c) parada na agitação para adição do incorporador de ar, da espuma aquosa, ou do agente antiespumante (composição de referência); e

(d) cisalhamento do microconcreto por mais 60 s.

Após a mistura, as amostras foram moldadas, com 60 mm de altura e 50 mm de diâmetro, e curadas por 28 dias em 25 °C e 98% de umidade relativa.

Resultados

Ar incorporado no estado fresco

Na Foto: Mario S. Takeashi.

Figura 8 - é apresentada a variação do teor de ar incorporado nos microconcretos em função do teor de aditivo, tanto adicionado na composição (AIA) quanto na forma de espuma aquosa (espuma). Tais teores foram quantificados em relação à massa total de pó seco, e no caso da espuma aquosa os teores foram determinados com base da concentração de aditivo na solução antes da agitação e da massa de espuma utilizada no microconcreto. Todas as medidas foram realizadas cerca de 2 min após a mistura.

Figura 6 - Sequência de preparação da espuma aquosa - (a) a solução aquosa (água + incorporador de ar) está em repouso; (b) observa-se a espuma formada após agitação por 3 min de agitação; e (c) a separação da espuma para adição no microconcreto

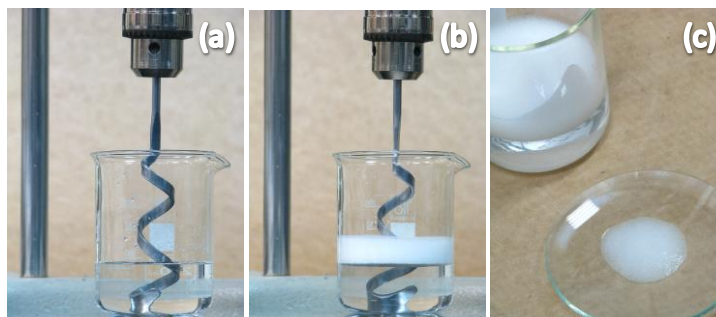
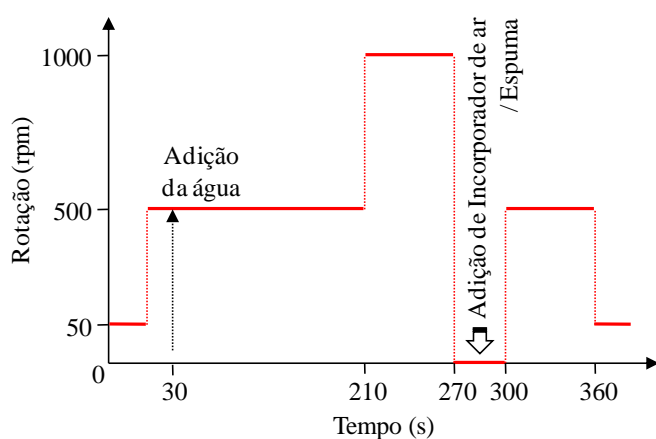


Figura 7 - Programação utilizada para o processamento dos microconcretos (a) e equipamento utilizado para a mistura - reômetro do tipo planetário (b)

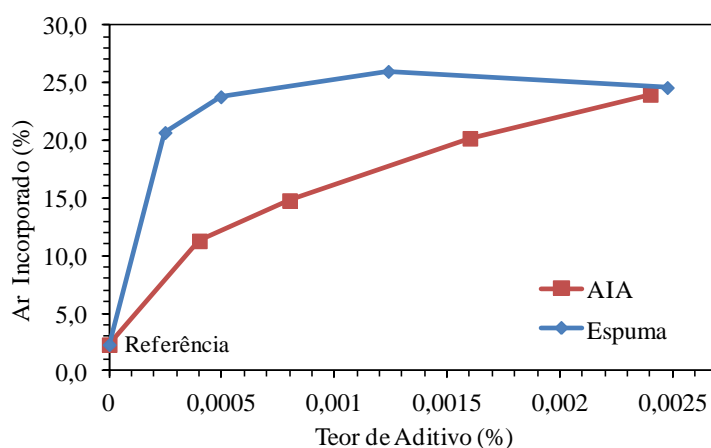


(a)

(b)

Foto: Mario S. Takeashi.

Figura 8 - Teor de ar incorporado após a mistura, em função da rota de incorporação de ar



Nos microconcretos misturados sem incorporador de ar, referência adotada, constatou-se a presença de cerca de 3% de ar incorporado, mesmo com o uso de aditivo antiespumante à base de ésteres hidrofóbicos. Nesses casos, o ar foi gerado somente pelo vórtice imposto durante o

cisalhamento, e as bolhas de ar, por serem instáveis, foram colapsadas rapidamente.

No caso dos microconcretos aditivados, seja na forma de pó ou de espuma aquosa, o volume de ar incorporado foi maior e dependente do teor de

aditivo e da rota de processamento: a geração de ar por meio da injeção de espuma foi mais eficiente, resultando em maior volume de ar com menor quantidade de incorporador.

A capacidade espumante do incorporador de ar possui correlação tanto com a quantidade de aditivo livre na fase líquida da pasta quanto com a quantidade deste aditivo adsorvido no cimento (ROMANO; PILEGGI, 2012). Sendo assim, quando se coloca o incorporador de ar em pó na composição, a incorporação ocorre mais lentamente e menores teores de ar são obtidos, pelo fato de o processo de formação das bolhas de ar ainda estar na fase inicial, não sendo atingido o estágio de maturação.

Além disso, ocorre a competição entre a formação das bolhas de ar e a adsorção do incorporador de ar na superfície das partículas, reduzindo a quantidade efetiva deste aditivo para a redução da tensão superficial da água.

Como o ciclo de vida das bolhas de ar pode ser dividido em três fases – formação, maturação e colapso (SALAGER, 2002; ROMANO, 2005) –, o teor de ar incorporado a partir da injeção da espuma aquosa foi maior porque as bolhas de ar foram inseridas no estágio de maturação, atingindo o nível máximo de ar (cerca de 25%) com teores de aditivo entre 0,001% e 0,0015%. Por outro lado, com a adição do incorporador de ar em pó, esse limite de ar não foi atingido nem com teor próximo a 0,0025%.

Neste trabalho a energia de mistura e o tempo de cisalhamento foram mantidos constantes durante a incorporação de ar e, por isso, as diferenças foram muito grandes em função da rota de processamento. Sabendo-se que tal limite de ar é característico da composição formulada devido, principalmente, às restrições volumétricas da

matriz cimentícia, o teor de ar próximo a 25% seria atingido no microconcreto misturado a partir da adição do pó, com teores maiores do aditivo.

Porosidade

Apesar de serem incorporados distintos teores de ar nos microconcretos, a manutenção das bolhas em forma de poros após o endurecimento depende da estabilidade das bolhas de ar.

Assim, nem todo volume incorporado gera porosidade nos microconcretos devido ao colapso das bolhas (DU; FOLLIARD, 2005). Desse modo, antes de avaliar as propriedades dos microconcretos após o endurecimento, avaliou-se a estabilidade do ar incorporado após a moldagem.

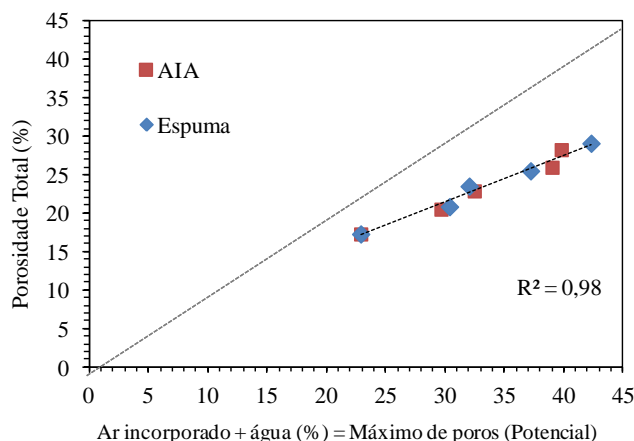
Na Figura 9 estão expressos os valores da porosidade total em função do teor de ar incorporado no estado fresco, somado ao teor de água utilizada no processamento. Essa soma indica a porosidade potencial do microconcreto, no caso de não haver colapso das bolhas.

Devido à perda de ar durante o processo de cura, a porosidade total apresentou valor inferior à soma ar incorporado + água, e os pontos posicionaram-se abaixo da linha tracejada, que representa a expectativa de porosidade total a ser atingida.

Segundo Du e Folliard (2005), a perda de ar incorporado, em decorrência do colapso das bolhas de ar, pode ser explicada de três maneiras distintas:

- (a) diferença de pressão interna da bolha e do meio que a circunda;
- (b) ruptura da película que segrega a bolha de ar do sistema cimentício; e
- (c) rápida drenagem hidrodinâmica do fluido que circunda as bolhas.

Figura 9 - Avaliação da porosidade total em relação ao método de incorporação de ar



Nas duas rotas de processamento (adição de AIA e injeção de espuma aquosa) houve perda de ar incorporado; conseqüentemente, a porosidade total observada foi menor que o potencial de porosidade (% de ar + % de água de amassamento). Para teores de AIA similares foram constatadas porosidades totais próximas, ainda que a injeção de espuma aquosa tenha ocasionado maior incorporação de ar no estado fresco. As bolhas de ar no estágio de maturação, adicionadas pela injeção de espuma aquosa, colapsaram-se mais rapidamente, uma vez que parte de seu ciclo de vida já havia sido consumido antes de sua inserção no sistema cimentício.

Como a porosidade é a variável que mais influencia as características dos microconcretos no estado endurecido, os próximos resultados são apresentados em função da quantidade de poros presentes nas amostras (porosidade total).

Resistência mecânica

Na Figura 10 é apresentada a relação entre a resistência à compressão uniaxial e a porosidade total medida nos microconcretos, para as duas rotas de processamento. As barras verticais indicam os desvios dos resultados dos ensaios de resistência mecânica, e as horizontais representam os desvios obtidos para a porosidade total.

Como a porosidade total resultante não apresentou relação com a rota de processamento, não foi possível apontar diferenças significativas na resistência mecânica, em função da rota de processamento.

No entanto, os resultados obtidos estão coerentes com a literatura, e a resistência mecânica apresentou elevada correlação com a quantidade de poros na argamassa (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000). O acréscimo na quantidade de poros reduziu o valor da tensão de ruptura dos microconcreto. Dessa forma, a variação do teor de incorporador de ar, seja o adicionado na formulação ou a partir da injeção de espuma aquosa, interferiu inversamente nessa propriedade do estado endurecido.

Permeabilidade ao ar (método de *vacuum-decay*)

A caracterização da permeabilidade ao ar permite uma análise mais criteriosa da microestrutura obtida pela introdução das bolhas de ar na pasta cimentícia. Tal propriedade ilustra a facilidade com que os agentes de degradação podem ser

conduzidos ao interior do concreto ou argamassa, fato que implica a redução da vida útil do material cimentício (TORRENT, 1992; TORRENT; FRENZER, 1995). Sendo assim, a avaliação da permeabilidade ao ar pode ser um critério para a avaliação do desempenho do material cimentício.

Na Figura 11 são apresentados os resultados de permeabilidade ao ar dos microconcretos obtidos a partir das diferentes rotas de processamento, em função da porosidade total.

Da mesma forma que para a resistência mecânica, a permeabilidade ao ar apresentou correlação com a porosidade total do microconcreto, sendo maior quanto maior o teor de aditivo utilizado no processamento. No entanto, neste caso foi possível observar as consideráveis diferenças provocadas na microestrutura endurecida, pois a permeabilidade dos microconcretos moldados com injeção de espuma foi maior que para a adição de AIA na formulação.

Tal observação foi confirmada pela análise da microscopia óptica apresentada na Figura 12, ilustrando a interconectividade dos poros presentes nos microconcretos obtidos através da injeção de espuma aquosa.

Em (a) não foi possível destacar os poros, pois a referência foi moldada com adição de agente antiespumante. Em (b) os microconcretos obtidos com a adição do incorporador de ar possuem poros sem conexão. Em (c) é apresentada a micrografia do microconcreto misturado com injeção de espuma; e em (d) é destacada a interconexão dos poros gerados. Ao gerar a espuma aquosa, as bolhas de ar são formadas próximas umas das outras, fato que facilita a formação dos canais de percolação na microestrutura gerada pelo sistema cimentício.

De acordo com Kearsley e Wainwright (2001), se a porosidade total for elevada e existir interconexão entre os poros, a permeabilidade também será elevada. Entretanto, se a porosidade for alta, porém não ocorrer conectividade entre os poros, a permeabilidade não será afetada.

O primeiro caso pode ser relacionado com os resultados obtidos pela rota de processamento com espuma aquosa, e com certeza será mais fácil a penetração dos agentes de degradação ao interior do microconcreto, enquanto a segunda afirmação refere-se aos dados obtidos com o processamento mediante a adição de AIA na formulação.

Figura 10 - Impacto da porosidade total na resistência a compressão uniaxial dos microconcretos

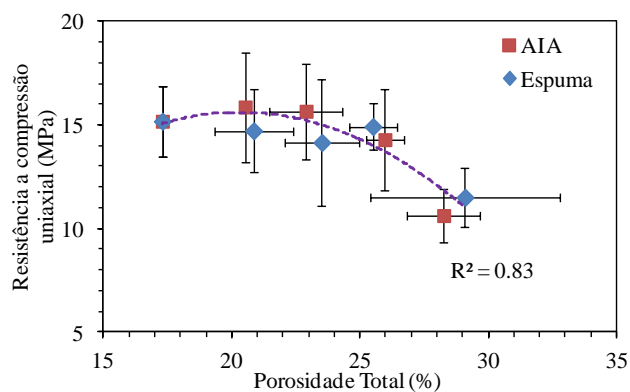


Figura 11 - Impacto da porosidade total na permeabilidade ao ar dos microconcretos

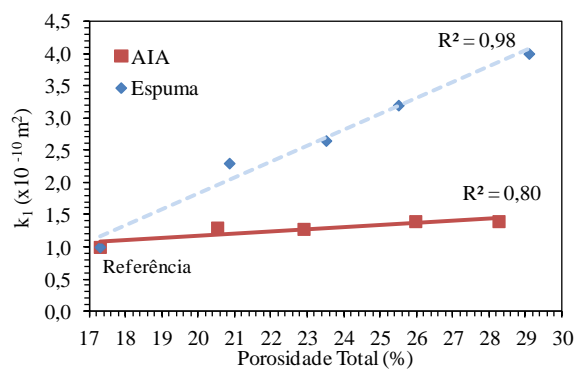
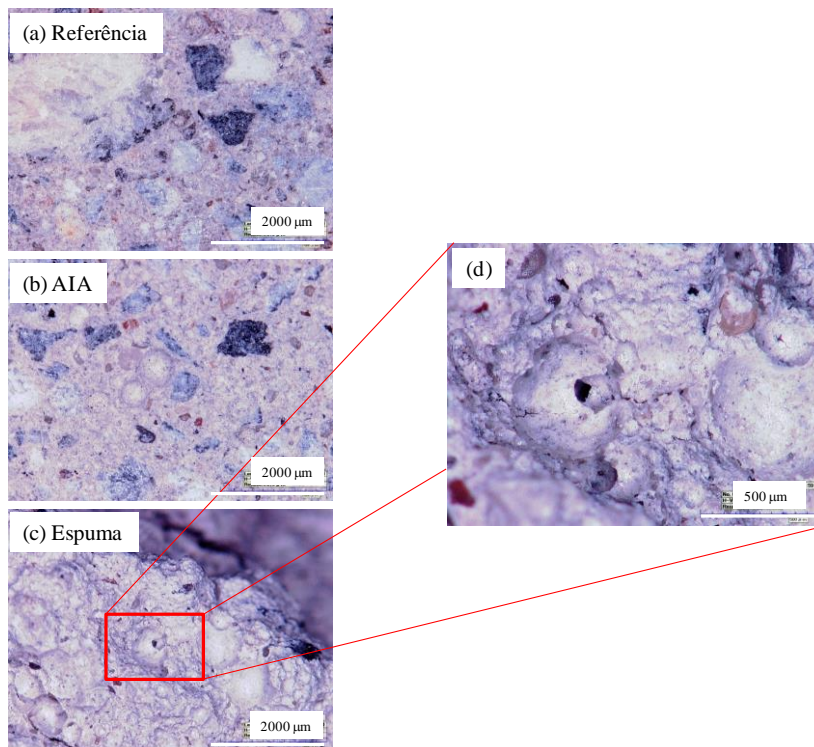


Figura 12 - Micrografia óptica: (a) referência - 50x, (b) AIA - teor de aditivo 0,0025(%) - 50x, (c) Espuma aquosa - teor de aditivo 0,0025(%) - 50x, (d) interconectividade dos poros - 200x



Conclusões

A incorporação de ar é dependente da rota de processamento. Com menor teor de aditivo obteve-se maior volume de bolhas de ar nos concretos processados a partir da injeção de espuma aquosa, devido à adição das bolhas de ar já formadas, no estágio de maturação.

Quanto maior o volume de ar incorporado, maior foi a perda durante o endurecimento, fato que ilustra a instabilidade das bolhas de ar incorporadas.

As alterações no volume de ar incorporado no estrado fresco resultaram em alteração na porosidade total dos microconcretos, afetando tanto a resistência mecânica quanto a permeabilidade ao ar, em ambas as rotas de processamento.

No entanto, a resistência mecânica não sofreu modificação significativa em decorrência da alteração da rota de incorporação de ar nos microconcretos, porém a permeabilidade ao ar, propriedade intimamente ligada ao desempenho e à durabilidade dos materiais cimentícios, foi muito maior nos microconcretos onde o ar foi incorporado pela injeção de espuma aquosa.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13278. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. 1995.
- ANTUNES, R. P. N. **Influência da Reologia e da Energia de Impacto na Resistência de Aderência de Revestimentos de Argamassa**. São Paulo, 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- DU, L.; FOLLIARD, J. K. Mechanisms of Air Entrainment in Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 8, p. 1463-1471, 2005.
- INNOCENTINI, M. D. M. *et al.* Otimização da Permeabilidade de Filtros de Aerossóis Para Altas Temperaturas Preparados a Partir da Técnica de Adição de Espuma Aquosa em Suspensão Cerâmica. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 67-77, 2009.
- KEARSLEY, E. P.; WAINWRIGHT, P. J. Porosity and Permeability of Foamed concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 5, p. 805-812, 2001.
- NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K. Structure and Properties of Aerated Concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 5, p. 321-329, oct. 2000.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Pini, 1982.
- POWERS, T. C. Void Spacing as a Basic For Producing Air-Entrained Concrete. **Journal of American Concrete Institute**, v. 25, n. 9, p. 741-760, 1954.
- RAMACHANDRAN, V. M. **Concrete Admixtures Handbook**. New York: Noyes, 1984.
- RIXON, R.; MAILVAGANAN, M. **Chemical Admixtures For Concrete**. 3th ed. London: E & FN Spon, 1999.
- ROMANO, R. C. O. **Produção e Caracterização de Cerâmicas Porosas Pelo Método de Injeção de Espumas Aquosas**. São Carlos, 2005. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.
- ROMANO, R. C. O. *et al.* Impacto do Tipo de Misturador e do Tempo de Mistura nas Propriedades de Argamassas Industrializadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 109-118, out./dez. 2009.
- ROMANO, R. C. O.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Propriedades do Concreto no Estado Fresco. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, v. 1, p. 453-500, 2011.
- ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G. Temperature's Role in the Rheological Behavior of Cementitious Pastes Prepared With Air-Entraining Admixtures. **Applied Rheology**, v. 22, 2012.
- ROMANO, R. C. O. **Incorporação de Ar em Materiais Cimentícios aplicados em construção Civil**. São Paulo, 2013. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- SALAGER, J. L. Surfactantes: tipos y usos. **Cuaderno FIRP**, S300A, p. 1-54, Universidad de los Andes, Merida, Venezuela, 2002.
- TORRENT, R. J. A Two-Chamber Vacuum Cell For Measuring the Coefficient of Permeability to Air of the Concrete Cover on Site. **Material Structure**, v. 25, n. 150, p. 358-365, jul. 1992.
- TORRENT, R. J.; FRENZER, G. Methods For Measuring and Assessing the Characteristics of Concrete Cover on Site. **Report # 516**, Office Federal des Routes, Zürich, 1995.

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. **Manual on Control of Air Content in Concrete**. Illinois: Portland Cement Association, 1998.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fapesp, pelo suporte à realização do trabalho.

Danilo dos Reis Torres

Escola Politécnica | Departamento de Construção Civil | Universidade de São Paulo | Av. Professor Almeida Prado, Trav. 2, n. 83 | Cidade Universitária, Butantã | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-900 | Tel.: (11) 3091-5382 | E-mail: drtorres.poli@gmail.com

Alessandra Lie Fujii

Escola Politécnica | Departamento de Construção Civil | Universidade de São Paulo | Tel.: (11) 3091-5382 | E-mail: liefujii@gmail.com

Roberto Cesar de Oliveira Romano

Escola Politécnica | Departamento de Construção Civil | Universidade de São Paulo | Tel.: (11) 3091-5248 | E-mail: rcorjau@gmail.com

Rafael Giuliano Pileggi

Escola Politécnica | Departamento de Construção Civil | Universidade de São Paulo | Tel.: (11) 30915442 | E-mail: rafael.pileggi@usp.br

Revista Ambiente Construído

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
Fax: +55 (51) 3308-4054
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br